

## 이암풍화토의 횡방향압밀 및 투수특성

### A Study on the Horizontal Consolidation and Permeability Characteristics of Decomposed Mudstone Soil in Pohang

김 영 수\*<sup>1</sup> Kim, Young-Su

김 기 영\*<sup>2</sup> Kim, Ki-Young

백 영 식\*<sup>3</sup> Paik, YoungShik

#### Abstract

Consolidation and permeability are major engineering properties of soil. In clay, coefficient of permeability and consolidation can be calculated by incremental loading consolidation test. However, it is known that the incremental loading test has several deficiencies including long testing time, non-uniform stress state, very soft clay and problem of back pressure saturation. Specially, it is not performed with horizontal consolidation test. Several methods have been proposed for obtaining reliable values of  $C_v$ . Among these, the square root of time-fitting method proposed by Taylor(1948) and logarithm of time-fitting method, also called Casagrande's method, are used extensively in soil engineering practice. But these methods are not amenable for the absence of initial linear portion and have the difficulties involved in distinguishing secondary compression from primary compression. Rowe cell consolidation tests were carried out in this study with different trimming axis and sample size. The results were compared with those of other methods; Casagrande, Taylor, Hyperbolic and  $\delta/t$ -logt. From the results, we explained a relationship between horizontal coefficient of permeability and void ratio was obtained. Finally, the directly measured horizontal coefficient of permeability obtained by using the Rowe cell was compared with the permeability derived indirectly from the consolidation test result.

#### 요 지

압밀과 투수는 흙의 중요한 공학적 특성중 하나이다. 일반적으로 점토에 대한 압밀 및 투수계수는 표준압밀시험을 통한 간접적인 방법에 의해 구해지고 있다. 그러나 표준압밀시험은 시료의 포화문제, 간극수압의 측정이 용이하지 않을 뿐 아니라, 횡방향 압밀시험을 수행 할 수 없어 그나마 정확한 횡방향 압밀계수를 산정할 수 없다. 그리고 압밀계수를 구하는데 가장 널리 이용되고 있는 해석방법인 Taylor 방법과 Casagrande 방법은 2차압밀이 불분명하고 초기 직선부분을 찾을 수 없는 경우에 대해서는 신뢰성이 떨어진다고 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 실험상의 단점을 보완할 수 있게 제작된 Rowe cell을 이용하여 포항지역의 이암풍화토를 이방성 및 시료의 크기를 고려해 횡방향 압밀시험을 실시하고 이 결과를 4가지 해석방법(Taylor, Casagrande, Hyperbolic,  $\delta/t$ -logt)으로 비교 분석하여 해석방법에 따른 압밀계수의 차이점을 파악하였다. 또한 투수계수(k)와 간극비(e)의 관계를 규정할 수 있는 투수상수를 해석방법에 따라 구하였으며, 압밀시험에서 계산된 간접투수계수의 타당성을 검증하기 위해 Rowe cell을 이용한 직접투수시험을 실시하고 그 결과를 비교하였다.

**Keywords** : Horizontal coefficient of consolidation, Horizontal coefficient of permeability, Rowe cell, Direct permeability test.

\*1 정희원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*2 정희원, 경북대학교 공과대학 토목공학과, 박사과정 수료

\*3 정희원, 경북대학교 공과대학 토목건축공학과 교수

## 1. 서론

압밀과 투수는 전단강도와 더불어 토질공학의 주된 측면중의 하나로 점성토 지반의 중요한 설계기준이 되고있다. 일반적으로 점성토에 대한 압밀 및 투수계수는 표준압밀시험을 통한 간접적인 방법에 의해 구해지고 있는 실정이다. 그러나 표준압밀시험은 시료의 포화문제, 상재하중의 불균일성 그리고 과잉간극수압의 측정이 불가능하며, 특히 횡방향 압밀시험을 수행할 수 없으므로 정확한 횡방향 압밀계수를 산정 할 수 없다. 본 논문에서는 이러한 실험상의 단점을 보완하면서 횡방향 압밀을 수행할 수 있도록 제작된 Rowecell을 이용 포항지역에 두루 산재하고 있는 이암풍화토를 대상으로 횡방향 압밀 및 투수시험을 이방성을 고려해 실시하고, 그 결과를 Casagrande, Taylor, Hyperbolic method 그리고  $\delta/t - \log t$  방법으로 구해 해석 방법에 따른 횡방향 압밀계수의 차이를 분석하고자 한다. 또한 정규압밀 영역에서 광범위하게 적용될 수 있는 투수계수( $k$ )와 간극비( $e$ )의 관계함수를 제안하였으며, 압밀 시험에서 얻어진 간접투수계수의 타당성을 검증하기 위해 Rowecell을 이용한 직접 투수시험을 실시하고 그 결과를 간접투수계수와 비교하였다.

## 2. 해석방법

기존의 Taylor와 Casagrande 방법으로 구해진 압밀계수의 단점을 보완하기 위한 시도가 여러 학자들로부터 있어왔다. 시간계수( $T$ )와 압밀도( $U$ )의 이론적인 관계특성을 비교할 수 있는 대표적 도해 방법으로는 Gilboy(1936), Casagrande & Fadum(1940), Naylor & Doran(1948), Su(1958), Scott,(1961), Madhav(1964), Cour(1971), Rao(1975), Sivaram & Swamee(1977) 등이 있다. 본 논문에서는 기존의 Taylor, Casagrande 방법 이외에 Sridharan, A. & Sreepada R, A.(1981), Sridhrsrn, A., Murthy, N. S. & Prakash, K.(1987)가 제안한 Rectangular Hyperbolic 방법 그리고 Pandian, N. S., Sridharan, A. & Kumar, K. S.(1992)가 제안한  $\delta/t - \log t$  방법을 이용해 횡방향 압밀계수를 비교 분석하였다.

### 2.1 Rectangular Hyperbolic Method

Rectangular hyperbolic 방법은 넓은 범위의 시간계수( $T$ )에서 Terzaghi의  $U - T$ 의 관계가 Rectangular hyper-

bola 관계에 있다는 점에 착안하고 있다. 따라서 선형적인 간극수압의 분포와 양방향 배수조건 하에서  $T/U - T$ 의 관계는 Fig. 1(a)와 같다.  $T/U - T$ 의 관계에서 압밀도 60%와 90%에 해당되는 지점과 원점과의 교점을 지나는 직선과의 기울기비  $M_1, M_2$ 는 2.031과 1.354로 나타났다. 이를 통해 경험적인 곡선상에  $t_{60}$  과  $t_{90}$  점을 나타낼 수 있다. 이와 같은 방법으로 임의의 압밀도에 대한 점을 이에 해당하는 기울기의 비  $M_i/M$ (이하는  $A$ 로 표시)를 이용해 나타낼 수 있다. Fig. 1(a)를 통해 임의의 압밀도 60-90%에 대해  $t/(\delta - \delta_i) - t$  그림의 직선부분은 식 (2)로 표현될 수 있다.

$$T/U = M_i T$$

$$1/U = M_i \tag{1}$$

$$A = 1/MU$$

$$\frac{t}{(\delta - \delta_i)} = m' t + c' \tag{2}$$

여기서,  $\delta_i$ 는 초기 압축이며,  $m'$ 는 직선의 기울기,  $c'$ 는  $t/(\delta - \delta_i)$  축과의 교점이다. 그리고  $t/(\delta - \delta_i) - t$  그림의 직선부분과 교차하면서 원점을 지나는 직선의 식은 다음과 같다.

$$\frac{t}{\delta - \delta_i} = Am' t \tag{3}$$

여기서,  $A$ 는 무차원이며 순전히 압밀도만의 함수이다. 식 (1), 식 (2), 그리고 식 (3)을 이용해 임의의 압밀도에 대한 시간( $t$ )은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있으며 식 (5)에서 압밀계수( $C_v$ )를 구할 수 있다.

$$t = \frac{c'}{(A-1)m'} \tag{4}$$

$$C_v = \frac{TH^2}{t}$$

$$C_v = T(A-1) \frac{m'H^2}{c'} \tag{5}$$

$$C_v = \frac{Bm'H^2}{c'}$$

$$\text{여기서, } B = T(A-1) = C/M = 0.297 \tag{6}$$

이와 유사하게 간극수압의 분포가 Half-sine 곡선분포인 경우의  $U - T$  관계 역시 Fig. 1(b)와 같은 Rectangular hyperbola 관계를 나타낸다. 따라서,  $T/U - T$  그림에서

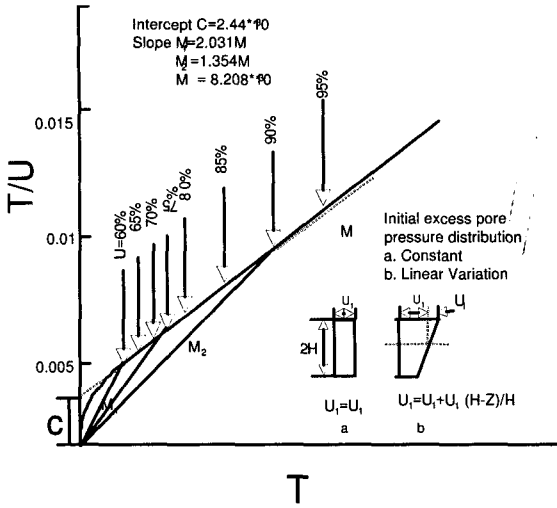


Fig. 1(a). Theoretical  $T/U$  vs  $T$  (Rectangular/Linear P.W.P)

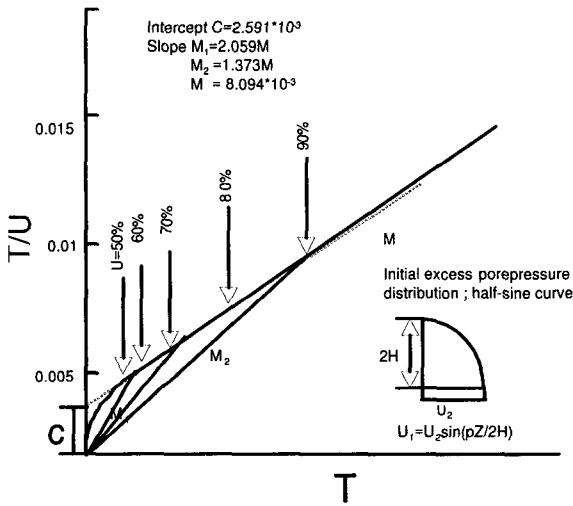


Fig. 1(b). Theoretical  $T/U$  vs  $T$  (Half-sine curve P.W.P)

압밀도가 50% - 90%의 범위에 대해 상관계수가 0.9999인 직선부분을 얻을 수 있으며, 이 경우도 마찬가지로 A는 식 (1)을 이용해 구할 수 있고,  $C_v$ 의 계산을 위해 필요한 B는 식 (6)으로부터 0.32 이다.

## 2.2 $\delta/t$ -log $t$ Method

Terzaghi 압밀이론에서 시간계수 ( $T$ )와 압밀도 ( $U$ )는  $\log(U/T) - \log T$ 의 그래프로 나타내었을 때 Fig. 2와 같은 두 개의 직선거동(bilinear)을 보임을 알 수 있다. 이러한 특성을 이용하여 압밀계수를 추정할 수 있는 방법이 Pandian, N. S., Sridharan, A. & Kumar, K. S.(1992)에 의

해 제안되었다. 이 방법은 bilinear 특성을 바탕으로 하며, 그래프에 대한 특성을 자세히 고찰해 보면 다음과 같은 특성을 가진다. 첫 번째 직선은 압밀과정의 시작을 나타내고 있으며, 압밀도 50%에 해당하는 0.2의  $T$ 의 범위를 포괄하고 있다. 이 직선은 대략 -0.5의 기울기를 가지고 있으며 다음과 같은 식 (7)로 표현될 수 있다.

$$\log(U/T) + 0.5025T - 0.5047 = 0 \quad (7)$$

첫 번째 직선부분 이후, 다른 기울기(-1)를 가진 직선부분으로 전이되는 부분이 나타나고, 이후 두 번째 직선부분이  $T=2.7$ ,  $U=99.9\%$ 에서 시작된다. 이 직선은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\log(U/T) + \log T = 0 \quad (8)$$

이들 직선부분을 컴퓨터를 이용한 유한차분법으로 곡선

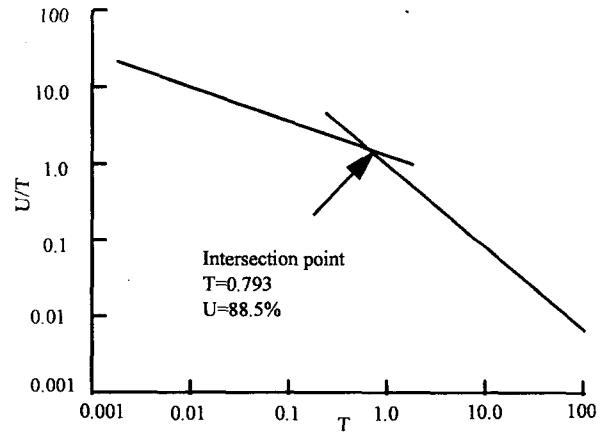


Fig. 2. Theoretical  $\log(U/T)$  vs  $\log T$

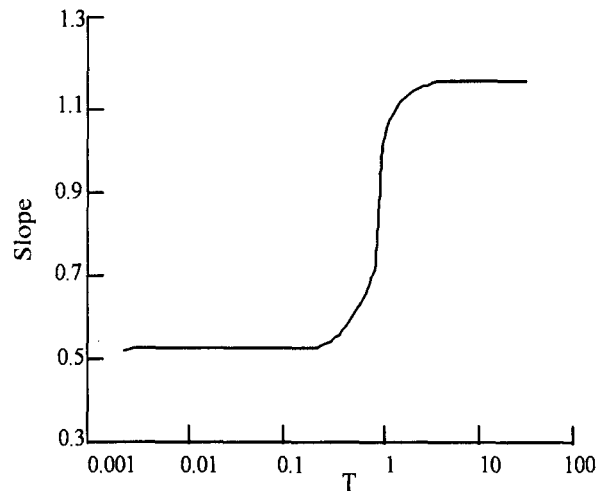


Fig. 3. Slope variation with factor

상에 나타나어 기울기를 평가한 결과는 Fig. 3과 같다. 이론적인 곡선의 기울기의 변화를 시간계수(  $T$  )의 함수로 제시한 결과 두 개의 직선이 넓은 범위에 걸쳐 일정한 기울기를 가짐을 알 수 있고 기울기가 변화하는 전이부분은 매우 좁은 범위에서 한정되어 있음을 볼 수 있다. 이론 곡선 상에서 교점을 통해 얻은  $T=0.797$  이고 이에 해당하는 압밀도는 85% 임을 알 수 있다. 실험 데이터를 전형적인  $\delta/t - \log t$ 의 그래프에 나타내 보면 이론적으로  $\log(U/T) - \log T$ 의 그래프와 같은 bilinear의 특성을 보일 것이며, 직선부분의 교점은  $T=0.793$  ( $U=88.5\%$ )에 해당하는  $t$ 의 값을 나타낼 것이다. 이때의  $C_v$  값은 다음과 같이 계산된다.

$$C_v = \frac{0.793d^2}{t_{88.5}}$$

### 2.3 횡방향 압밀계수( $C_{ro}$ )

횡방향 압밀계수(  $C_{ro}$  )를 구하는 방법은 Boundary 조건에 따라 크게 Equal strain 및 Free strain으로 나눌 수 있으며, 배수방법에 따른 시간계수는 압밀도 50%인 경우 0.086, 압밀도 90%인 경우엔 0.288이다. 시험방법에 따른 시간계수는 Head, K. H.(1986)을 참조하기 바란다. 본 연구에서의 Boundary조건은 Equal strain이며, 이 때의 횡방향 압밀계수(  $C_{ro}$  )는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$C_{ro} = 0.131 \frac{T_{ro} D^2}{t} (m^2/year)$$

여기서,  $T_{50}$ ; 0.0866,  $T_{90}$ ; 0.288  
 $D$ ; Sample diameter(mm)

### 2.4 투수계수와 간극비의 관계

투수는 흙의 압밀특성에 의해 커다란 영향을 받는다. 많은 학자들이 투수계수(  $k$  ) - 간극비(  $e$  )와의 관계에 대한 많은 방정식을 제안해 왔으며, 그 중 Taylor(1948)는 모래에 대한 투수계수를 식 (9)로 나타내었다.

$$k = C \frac{e^3}{1+e} \quad (9)$$

$$C = C_s \frac{\gamma_w}{\mu} D_s^2$$

여기서,  $C_s$ ; 형상계수

$\mu$ ; 간극유체의 점성계수

$\gamma_w$ ; 물의 단위중량

$D_s$ ; 입자의 직경

또한 Taylor는 임의의 점토에 대해 간극비(  $e$  )와  $-\log k$  가 선형적인 관계임을 제안하였다. 그러나 이 관계가 항상 서리치지는 아니므로 모래에 대한 점토에 대해 다음과 같이 변형된 식 (10)을 제안하였다.

$$k = C \frac{e^n}{1+e} \quad (10)$$

식 (10)은 다시 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\log[k(1+e)] = n \log e + \log C \quad (11)$$

여기서,  $n$ 은 직선의 기울기이고  $\log C$ 는 절편의 크기를 나타낸다. 이러한 관계는 많은 종류의 정규압밀 점토에서 충분히 입증되었다.

### 2.5 직접투수시험을 이용한 횡방향 투수계수 산정이론

Rowecell을 이용한 횡방향 직접투수시험의 투수계수 산정식은 Fig. 4와 같이 수압차에 의하여 흐름이 발생할 경우 반경  $r$ 인 지점에서 미소부분의  $dr$ 에 대한 유량은 Darcy의 법칙을 적용하여 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q = kiA, \quad A = 2\pi rH, \quad i = \frac{dh}{dr} \quad (12)$$

$$\therefore q = 2\pi rH \frac{dh}{dr} k_r$$

여기서  $dh/dr$ 는 동수경사,  $H$ 는 시료의 높이를 나타내며, 이를 반경  $r$ 과 수두  $h$ 에 대해 적분하면 식(13)과 같다.

$$k_r(h_2 - h_1) = \frac{q}{2\pi H} \log_e \left( \frac{r_2}{r_1} \right) \quad (13)$$

여기서,  $r_1, r_2$ 는 모래기둥과 시료의 반경,  $h_1, h_2$ 는  $r_1, r_2$  일때의 수두를 의미한다. 압력차와 수두차의 관계는 식(14)와 같고, 이를 식(13)에 대입하면 식(15)와 같은

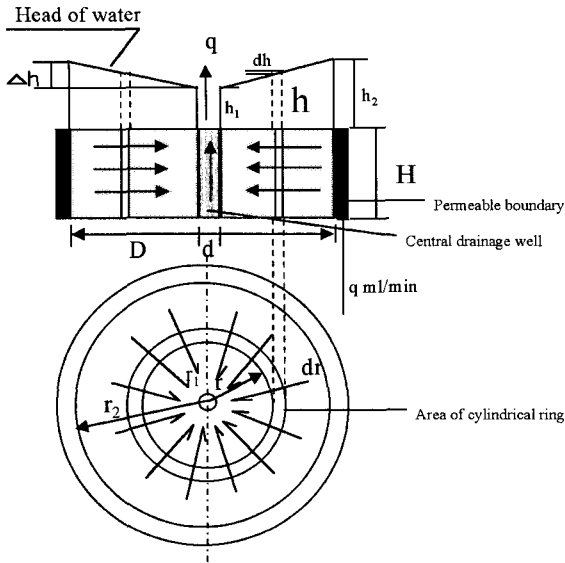


Fig. 4. Horizontal direct permeability test

수평방향 투수계수 산정식이 유도된다.

$$\Delta P = \Delta h \rho g = (h_2 - h_1) \rho g \quad (14)$$

$$k_r \text{ (m/sec)} = 0.26 \left( \frac{q}{H \Delta p} \right) \log_e \left( \frac{D}{d} \right) \times 10^{-4} \quad (15)$$

여기서,  $q$ ; ml/minute

$H$  &  $\Delta h$ ; mm

$\Delta p$ ;  $\text{kN/m}^2$

$D$ ; 시료의 직경

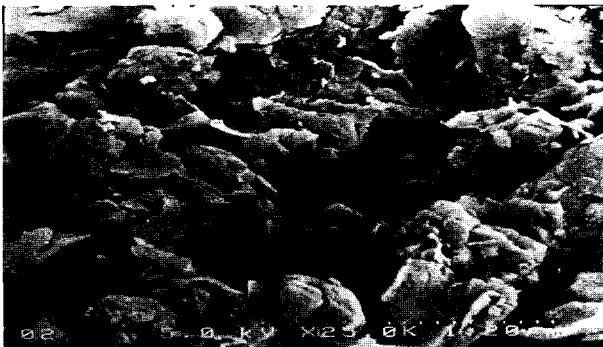
$d$ ; well의 직경

$\rho$ ;  $\text{Mg/m}^3$

$g$ ;  $9.81 \text{ m/sec}$

### 3. 실내시험

#### 3.1 시료특성



일반적으로 풍화작용에 의해 형성된 세립질 퇴적물은 주로 석영, 장석, 백운모, 흑운모, 그리고 점토광물로 구성되어 있으며, 그 외에 중광물과 같은 조암광물이 들어있기도 하다. Fig. 5는 포항 두호동 지역에서 채취한 이암의 XRD 결과를 나타낸 것으로 석영(Q)과 장석(Al) 그리고 다량의 점토광물(CI)로 구성되어 있음을 알 수 있다. 또한 SEM 사진을 10000~25000 배율로 확대해 본 이암풍화토의 입자구조는 Fig. 6과 같으며, 물성치는 Table 1과 같다

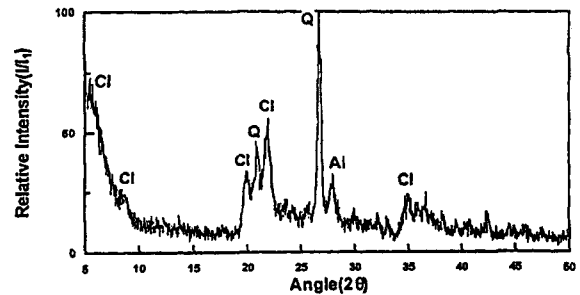


Fig. 5. XRD diagram

Table 1. 이암풍화토의 기본 물성치

Gs	D <sub>50</sub> (mm)	D <sub>10</sub> (mm)	C <sub>u</sub>	C <sub>c</sub>	LL(%)	PL(%)	PI
2.595	0.032	0.009	4.275	0.575	48.25	23.7	24.55

#### 3.2 시료성형

본 연구에서는 포항 두호동 지역에 산재한 이암 풍화토를 채취 실내에서 자연건조시킨 다음 No. 40 체를 이용하여 거르고 이 시료를 액성한계 2배의 함수비로 Fig. 7과 같은 진공 교반 장치가 부착된 예비 압밀 토조(27cm×30cm×40cm)에서 진공압(-60kpa)과 교반기를 동시에 작동시켜 시료속의 공기를 완전히 제거하였다. 그리고 0.037,

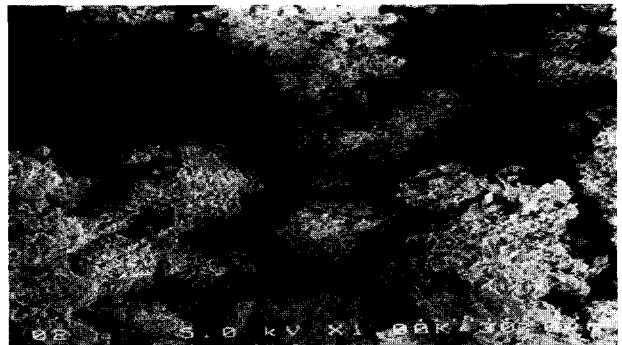


Fig. 6. SEM of completely decomposed mudstone

0.075, 0.15, 0.3, 0.6kg/cm<sup>2</sup>으로 단계적인 압밀을 실시하였으며, 예비압밀이 완료된 후 하중을 제거하고 시료를 재하방향(Sample A) 및 재하방향과 수직방향(Sample B)으로 일정크기로 절단하고 함수비의 변화와 응력변화를 최소화 하기위해 파라핀으로 밀봉한 후 실온에서 보관하였다. 시료의 균일성을 파악하고자 깊이에 따른 함수비 및 단위중량을 측정하였으며, 그 결과 큰 차이를 발견할 수 없었다.

### 3.3 시험장치

본 연구의 압밀 및 투수시험에 사용된 장치는 미국 GEOCOMP사에서 제작한 제품을 이용하였으며, 세부시험장치는 간극수압계, 배압장치, Volume Change로 구성되어 있다. Rowecell은 Hydraulic방식을 이용한 직경 15cm, 7.5cm를 사용하였으며, Cell 하단에는 간극수압을 측정할 수 있도록 되어있다. 지면상 자세한 내용은 Head, K. H.(1986), Rowe, P.W.(1966)을 참조하기 바람이며 시험장치 개요도는 Fig. 8과 같다.

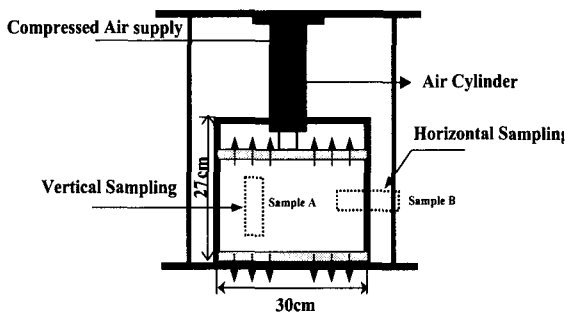


Fig. 7. Sampling method

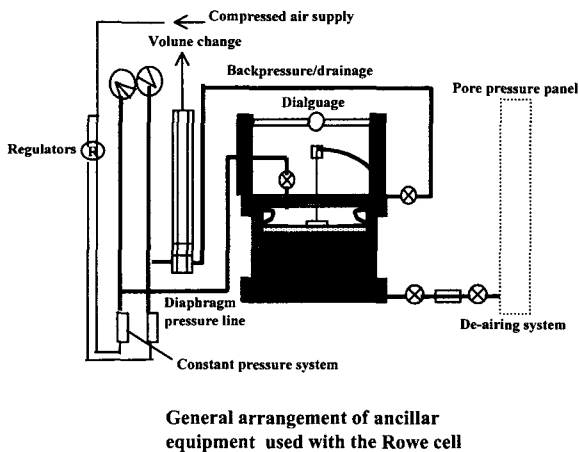
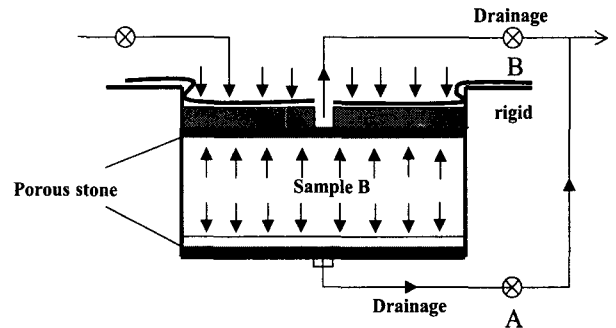


Fig. 8. General arrangement of Rowecell

### 3.4 시험방법

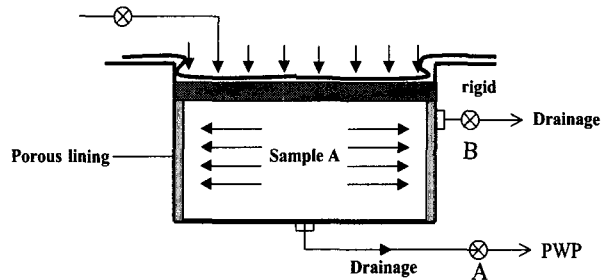
#### 3.4.1 압밀시험

Oedometer 시험시 시료의 크기는 ASTM Standard D2435에서 제안한 지름 6cm, 높이 2cm의 시료를 사용하였으며, 하중증가비는 1, 재하시간은 24시간으로 하였다. Rowecell을 이용한 압밀시험은 Fig. 9, 10과 같고 자세한 시험방법 및 Setting방법은 Head, K. H.(1986)가 제안한 방법을 따랐다. 시료의 크기는 Rowecell 7.5cm인 경우 높이 3cm, 지름 7.5cm, 그리고 Rowecell 15cm인 경우 높이 5cm, 지름 15cm로 하였다. 먼저 수직 및 횡방향 배수재를 충분히 끓여 공기를 제거한 후 시료를 Setting 시키고, 시료와 Diapharm 사이의 공기를 제거하였다. 그리고 Cell을 조립하고 시료의 상부에 선행압밀 하중을 가한 후 시료의 완전포화를 위해 Back Pressure를 상부 하중보다 약 20kpa 정도 작은 압으로 수직배수인 경우 상부를 통해 그리고 횡방향 배수인 경우 옆면을 통해 가하고 상재하중과 함께 300kpa까지 점증시켜가며 B-Value값을 측정하였다. B 값이 0.95이상이 된 시료에 대해 Sample B인 경우 Fig. 9의 B valve를 열면서 압밀을 실시하고, Sample A인 경우 Fig. 10의 B valve를 열면서



Vertical double drainage

Fig. 9. Horizontal consolidation(Sample B)



Radial outward drainage

Fig. 10. Horizontal consolidation(Sample A)

압밀을 실시하였다. 시험기간중 Back Pressure는 일정하게 유지시켰으며, 과잉간극수압은 시료의 하단에서 측정하였다. 하중단계는 0.6, 1.2, 2.4, 4.8kg/cm<sup>2</sup> 까지 가했으며, 재하 시간은 Oedometer와 같은 24시간으로 하였다.

### 3.4.2 직접투수시험

Sample B에 대한 직접투수시험 개요도는 Fig. 11과 같다. 각 단계별 압밀이 끝난 다음 시료의 상부와 하부를 통해 각기 다른 배압(약5kpa)을 이용해 시간당 유출되는 유량을 약 12시간 정도 측정하였다. Sample A인 경우, 동일 시료에 대한 직접 투수시험이 불가능하므로 Fig. 12와 같

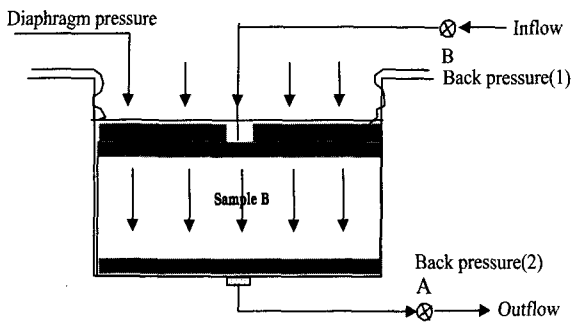


Fig. 11. Direct permeability test(Sample B)

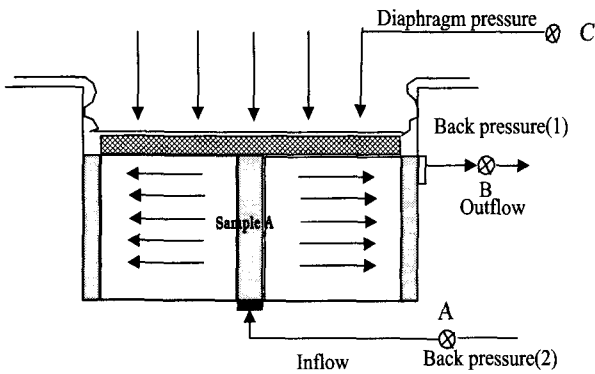


Fig. 12. Direct permeability test(Sample A)

은 방법으로 실시하였다. 먼저 시료중앙 부위를 직경비 (D/d) 약 5로 Cutting한 후 이 부분에 포화된 모래를 넣고 압밀시험과 같은 방법으로 포화시켜 단계별 압밀을 실시한 후 Valve A와 B를 통해 각기 다른 배압을 이용 Outward 방향으로 투수시험을 실시하였다.

## 4. 시험결과 및 해석

### 4.1 압밀계수의 비교

2장에서 언급한 네가지 해석방법에 의해 압밀계수 ( $C_{v90}$ )를 비교해 본 결과는 Table 3., Fig. 13., 14., 15와 같다. 통상적인 압밀이론에서 압밀계수는 일정하다고 가정한다. 그러나 유효응력이 선행압밀에 이르면 압밀계수는 급격히 감소하고 정규압밀 점토에서는 하중이 증가함에 따라 커지는 경향을 보인다. 본 논문에서도 하중증가에 따라 압밀계수는 대부분 증가하는 경향을 보였으며, A시료인 경우 Taylor 방법으로 구한  $C_{v90}$  값이 Casagrande 방법

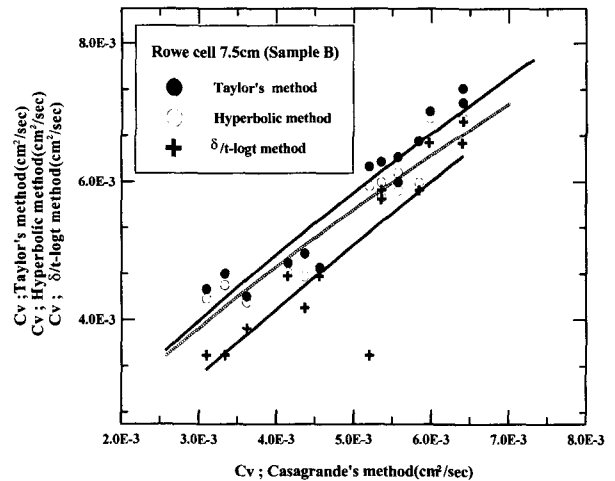


Fig. 13. Comparison for coefficient of consolidation

Table. 2 시험방법 및 시험종류

	Sample Type	Type of Test	Parameter	Ho(cm)	w(%)	e <sub>0</sub>	B Value
Consolidation Test	Sample B	Oedometer(Dia=6cm)	$C_{v90(oeda)}$	2	43.35	1.515	-
	Sample A	Rowecell(Dia=7.5cm)	$C_{r0(row7.5)}$	3	41.80	1.532	0.98
	Sample A	Rowecell(Dia=15cm)	$C_{r0(row15)}$	5	43.15	1.52	0.96
	Sample B	Rowecell(Dia=7.5cm)	$C_{v90(row7.5)}$	3	42.22	1.502	0.99
	Sample B	Rowecell(Dia=15cm)	$C_{v90(row15)}$	5	45.12	1.512	0.97
Direct Permeability Test	Sample A	Rowecell(Dia=7.5cm)	$k_{r0(row7.5)}$	3	43.13	1.528	0.96
	Sample A	Rowecell(Dia=15cm)	$k_{r0(row15)}$	5	42.18	1.520	0.97
	Sample B	Rowecell(Dia=7.5cm)	$k_{v90(row7.5)}$	3	42.22	1.502	0.99
	Sample B	Rowecell(Dia=15cm)	$k_{v90(row15)}$	5	45.12	1.512	0.97

Table 3. 시험방법 및 시험종류에 따른 압밀계수의 비교

Comparison $C_{v90}$ for Vertical drain(Sample B)												
단위 : [cm <sup>2</sup> /sec]												
Rowecell Test(Dia=7.5cm)				Rowecell Test(Dia=15cm)				Oedometer Test(Dia=6cm)				
Pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	Casagrande method	Taylor method	Hyperbolic method	$\delta/t$ -logt method	Casagrande method	Taylor method	Hyperbolic method	$\delta/t$ -logt method	Casagrande method	Taylor method	Hyperbolic method	$\delta/t$ -logt method
0.6	5.18*10 <sup>-3</sup>	5.40*10 <sup>-3</sup>	5.37*10 <sup>-3</sup>	4.63*10 <sup>-3</sup>	4.73*10 <sup>-3</sup>	5.09*10 <sup>-3</sup>	4.85*10 <sup>-3</sup>	5.71*10 <sup>-3</sup>	2.17*10 <sup>-3</sup>	3.81*10 <sup>-3</sup>	3.78*10 <sup>-3</sup>	1.25*10 <sup>-3</sup>
	5.5*10 <sup>-3</sup>	5.9*10 <sup>-3</sup>	5.66*10 <sup>-3</sup>	4.17*10 <sup>-3</sup>	4.54*10 <sup>-3</sup>	4.85*10 <sup>-3</sup>	4.48*10 <sup>-3</sup>	6.39*10 <sup>-3</sup>	2.02*10 <sup>-3</sup>	3.71*10 <sup>-3</sup>	3.43*10 <sup>-3</sup>	1.30*10 <sup>-3</sup>
1.2	5.57*10 <sup>-3</sup>	6.35*10 <sup>-3</sup>	6.13*10 <sup>-3</sup>	2.66*10 <sup>-3</sup>	4.23*10 <sup>-3</sup>	6.36*10 <sup>-3</sup>	6.03*10 <sup>-3</sup>	6.06*10 <sup>-3</sup>	2.64*10 <sup>-3</sup>	3.82*10 <sup>-3</sup>	3.80*10 <sup>-3</sup>	1.73*10 <sup>-3</sup>
	5.1*10 <sup>-3</sup>	6.2*10 <sup>-3</sup>	5.93*10 <sup>-3</sup>	3.49*10 <sup>-3</sup>	4.35*10 <sup>-3</sup>	6.25*10 <sup>-3</sup>	5.81*10 <sup>-3</sup>	6.01*10 <sup>-3</sup>	2.45*10 <sup>-3</sup>	3.70*10 <sup>-3</sup>	3.62*10 <sup>-3</sup>	1.93*10 <sup>-3</sup>
2.4	6.40*10 <sup>-3</sup>	7.14*10 <sup>-3</sup>	6.91*10 <sup>-3</sup>	6.56*10 <sup>-3</sup>	5.40*10 <sup>-3</sup>	7.16*10 <sup>-3</sup>	7.02*10 <sup>-3</sup>	6.98*10 <sup>-3</sup>	4.15*10 <sup>-3</sup>	7.14*10 <sup>-3</sup>	6.60*10 <sup>-3</sup>	2.52*10 <sup>-3</sup>
	6.4*10 <sup>-3</sup>	7.3*10 <sup>-3</sup>	6.9*10 <sup>-3</sup>	6.87*10 <sup>-3</sup>	5.08*10 <sup>-3</sup>	7.69*10 <sup>-3</sup>	7.16*10 <sup>-3</sup>	4.47*10 <sup>-3</sup>	3.62*10 <sup>-3</sup>	6.92*10 <sup>-3</sup>	6.56*10 <sup>-3</sup>	2.80*10 <sup>-3</sup>
4.8	5.35*10 <sup>-3</sup>	6.28*10 <sup>-3</sup>	5.99*10 <sup>-3</sup>	5.87*10 <sup>-3</sup>	4.94*10 <sup>-3</sup>	7.60*10 <sup>-3</sup>	6.13*10 <sup>-3</sup>	7.46*10 <sup>-3</sup>	4.32*10 <sup>-3</sup>	4.43*10 <sup>-3</sup>	4.34*10 <sup>-3</sup>	2.48*10 <sup>-3</sup>
	5.3*10 <sup>-3</sup>	6.2*10 <sup>-3</sup>	5.7*10 <sup>-3</sup>	5.7*10 <sup>-3</sup>	4.78*10 <sup>-3</sup>	7.61*10 <sup>-3</sup>	6.29*10 <sup>-3</sup>	7.57*10 <sup>-3</sup>	3.30*10 <sup>-3</sup>	4.31*10 <sup>-3</sup>	4.15*10 <sup>-3</sup>	2.51*10 <sup>-3</sup>

Comparison $C_{v0}$ for Horizontal drain(Sample A)												
단위 : [cm <sup>2</sup> /sec]												
Rowecell Test(Dia=7.5cm)				Rowecell Test(Dia=15cm)				Oedometer Test(Dia=6cm)				
Pressure(kg /cm <sup>2</sup> )	Casagrande method	Taylor method	Hyperbolic method	$\delta/t$ -logt method	Casagrande method	Taylor method	Hyperbolic method	$\delta/t$ -logt method	Casagrande method	Taylor method	Hyperbolic method	$\delta/t$ -logt method
0.6	7.16*10 <sup>-3</sup>	8.80*10 <sup>-3</sup>	.	.	1.47*10 <sup>-2</sup>	1.62*10 <sup>-2</sup>	.	.	.	.	.	.
	6.95*10 <sup>-3</sup>	8.71*10 <sup>-3</sup>	.	.	1.39*10 <sup>-2</sup>	1.45*10 <sup>-2</sup>	.	.	.	.	.	.
1.2	8.69*10 <sup>-3</sup>	9.26*10 <sup>-3</sup>	.	.	1.08*10 <sup>-2</sup>	1.35*10 <sup>-2</sup>	.	.	.	.	.	.
	9.02*10 <sup>-3</sup>	9.87*10 <sup>-3</sup>	.	.	1.05*10 <sup>-2</sup>	1.20*10 <sup>-2</sup>	.	.	.	.	.	.
2.4	1.01*10 <sup>-2</sup>	1.27*10 <sup>-2</sup>	.	.	1.21*10 <sup>-2</sup>	1.47*10 <sup>-2</sup>	.	.	.	.	.	.
	9.66*10 <sup>-3</sup>	1.24*10 <sup>-2</sup>	.	.	1.24*10 <sup>-2</sup>	1.24*10 <sup>-2</sup>	.	.	.	.	.	.
4.8	1.26*10 <sup>-2</sup>	1.68*10 <sup>-2</sup>	.	.	1.26*10 <sup>-2</sup>	1.54*10 <sup>-2</sup>	.	.	.	.	.	.
	1.21*10 <sup>-2</sup>	1.62*10 <sup>-2</sup>	.	.	1.23*10 <sup>-2</sup>	1.60*10 <sup>-2</sup>	.	.	.	.	.	.

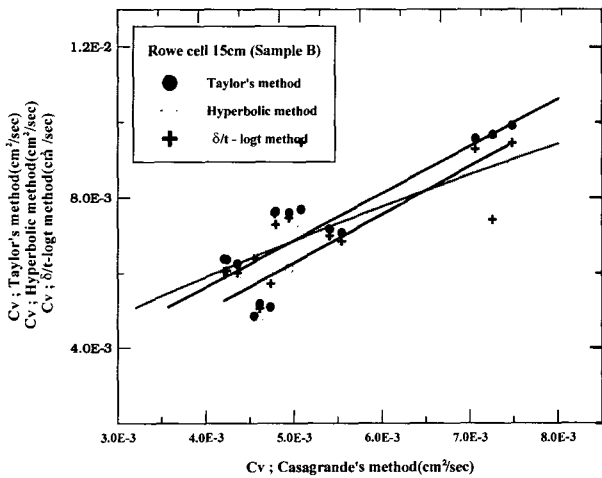


Fig. 14. Comparison for coefficient of consolidation

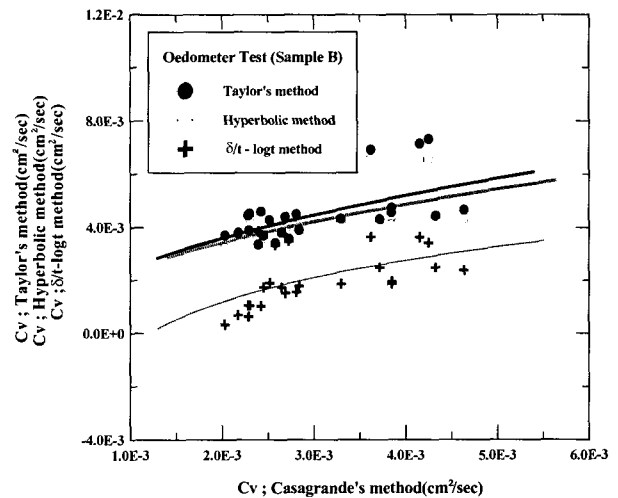


Fig. 15. Comparison for coefficient of consolidation

으로 구한  $C_{v90}$  값보다 약 1.04 - 1.16배 정도 크게 나타났고, B시료에서는 Taylor 방법으로 구해진  $C_{v0}$  값이 1.06 - 1.65배 정도 크게 나타났다. 이러한 경향은 Duncan, J. M.(1993)의 논문에서 얻은 1.66배 보다는 작은 수치이지만 대체적인 경향면에서는 일치한다고 할 수 있다. Hyperbolic method로 해석된  $C_{v90}$ 은 Casagrande 방법과 Taylor 방법으로 구한  $C_{v90}$  사이에 존재하고 있으므로 시험초기 급격한 압밀로 인해 초기곡선을 찾을 수 없는 경우

앞의 2가지 방법보다 유용한 방법으로 생각된다. 하지만  $\delta/t$ -logt 방법으로 해석한 값은 어떤 일정한 양상을 나타내지 않았다. 시료의 크기에 따른 압밀계수의 영향은 Rowe cell 7.5cm의 Taylor 방법으로 구해진  $C_{v90}$ 을 제외하고는 시료채취 방향에 상관없이 시료의 크기가 커질수록  $C_{v90}$ 와  $C_{v0}$ 는 증가하는 양상을 보였으며, 이러한 결과 Aboshi, (1973), Aboshi & Matsuda(1981), Aboshi(1991)가 연구한 직경과 높이의 비를 일정하게 하고 시료의 크기를 변화시



Table 4. 시험방법 및 종류에 따른 투수상수(  $n, C$  )

시험방법		해석방법		Casagrande's method	Taylor's method	Hyperbolic method	$\delta/t - \log t$ method	시험방법		해석방법		Casagrande's method	Taylor's method	Hyperbolic method	$\delta/t - \log t$ method
		$n$	$C$							$n$	$C$				
Sample B	Oedo test	$n$		3.03	5.65	5.76	7.16	Sample A	Oedo test	$n$	-	-	-	-	
		$C$		$1.26 \times 10^{-6}$	$1.56 \times 10^{-6}$	$1.48 \times 10^{-6}$	$8.42 \times 10^{-7}$			$C$		-	-	-	-
	Rowe (7.5cm)	$n$		4.92	4.9	5.06	4.46	Rowe (7.5cm)	$n$		4.11	3.64	-	-	
		$C$		$1.93 \times 10^{-6}$	$2.22 \times 10^{-6}$	$2.05 \times 10^{-6}$	$2.11 \times 10^{-6}$		$C$		$4.21 \times 10^{-6}$	$5.57 \times 10^{-6}$	-	-	
	Rowe (15cm)	$n$		7.59	7.36	8.14	7.56	Rowe (15cm)	$n$		7.46	7.42	-	-	
		$C$		$2.63 \times 10^{-7}$	$3.82 \times 10^{-7}$	$2.43 \times 10^{-7}$	$3.45 \times 10^{-7}$		$C$		$5.7 \times 10^{-7}$	$6.49 \times 10^{-7}$	-	-	
Direct Permeability Test	Rowe (7.5cm)	$n$	7.8				Direct Permeability Test	Rowe (7.5cm)	$n$	7.5					
		$C$	$1.95 \times 10^{-6}$						$C$	$2.22 \times 10^{-6}$					
	Rowe (15cm)	$n$	7.1				Rowe (15cm)	$n$	7.3						
		$C$	$1.25 \times 10^{-6}$					$C$	$1.22 \times 10^{-6}$						

\*c[cm/sec]

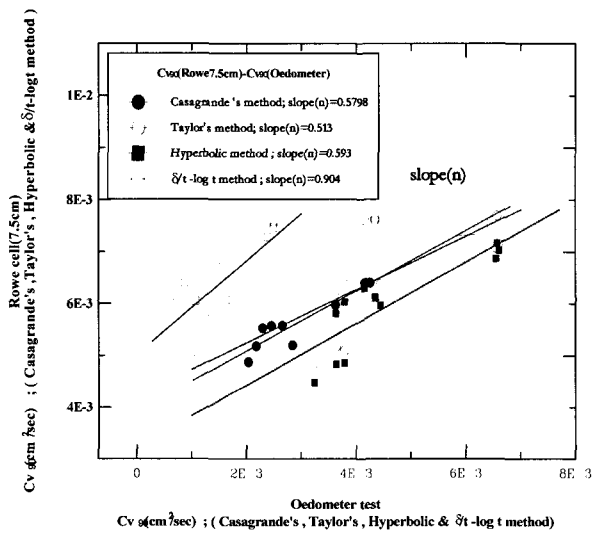


Fig. 16. Comparison for  $C_{v90}(\text{Row}7.5) - C_{v90}(\text{oedo})$

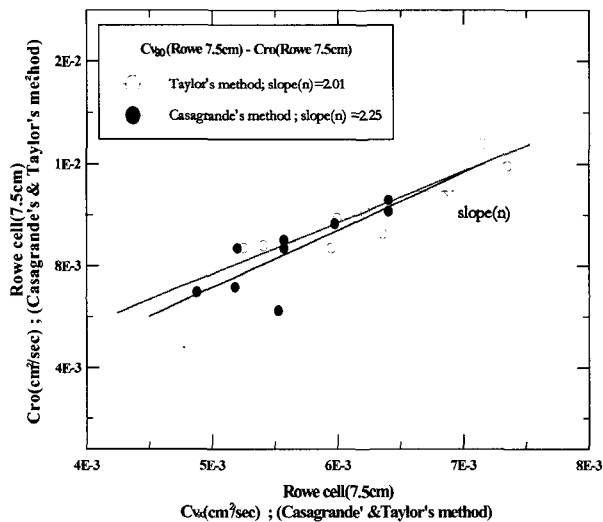


Fig. 17. Comparison for  $C_{v90}(\text{Row}7.5) - C_{ro}(\text{Row}7.5)$

켜가며 실시한 압밀시험 결과에서 보듯이 압밀계수는 시료의 크기가 증가함에 따라 조금씩 증가한다는 사실과 일치한다. 이로써 동일한 시료라 할지라도 시료의 직경과 높이에 따라 압밀계수는 변화함을 알 수 있다. 이방성에 따른 압밀계수의 경향을 살펴보면 동일한 시험조건인 경우 A 시료의  $C_{ro}$  값이 B 시료의  $C_{v90}$  값보다 다소 크게 나타남을 알 수 있다.

#### 4.2 $C_{v90}$ 과 $C_{ro}$ 사이의 관계

$C_{v90}$ 과  $C_{ro}$ 사이의 관계를 Oedometer test와 Rowecell (7.5cm) 시험에서 얻어진 데이터를 이용해 살펴본 결과는 Fig. 16., 17과 같다. 또한 식 (16)을 이용해 Oedometer Test를 통한 간접적인 횡방향압밀계수  $C_{ro}$  값을 구할 수 있다.

$$\frac{C_{ro}(\text{row})}{C_{v90}(\text{oedo})} = \frac{C_{ro}(\text{row})}{C_{v90}(\text{row})} \times \frac{C_{v90}(\text{row})}{C_{v90}(\text{oedo})} \quad (16)$$

Fig. 16에서 각각의 해석방법에 따른  $C_{v90}(\text{row}7.5) - C_{v90}(\text{oedo})$ 의 기울기를 살펴보면 4 가지 방법중  $\delta/t - \log t$  방법을 이용해 구한 기울기가 다른 3가지 방법으로 구한 기울기 0.513, 0.579, 0.593보다 크게 나타났다. 또한  $C_{v90}(\text{row}7.5) - C_{ro}(\text{row}7.5)$ 의 관계에서 Taylor 방법과 Casagrande 방법으로 구한 기울기는 각각 2.01, 2.25로 나타났다.

#### 4.3 간극비( $e$ )-투수계수( $k$ )와의 관계

2장에서 언급한 Taylor 방법을 이용해 간극비( $e$ ) - 투수계수( $k$ )의 관계를 살펴보면 Fig. 18., 19., 20., 21., 22에서처럼 해석방법과 시료의 크기 그리고 이방성에 따라  $n, C$ 값은 조금씩의 차이가 나타남을 알 수 있다. 먼저 해석방법에 대한 차이점을 살펴보면 동일한 시료의 크기를 기준으로 볼 때 Sample B 인 경우, Oedometer 시험에서는 Casagrande, Taylor, Hyperbolic 방법으로 해석한  $n$ 값은 3.03 - 5.76,  $C$ 값은  $1.26 - 1.56 \times 10^{-6}$  cm/sec의 범위로 방법에 따른 큰 차이가 없었으나,  $\delta/t - \log t$  방법으로 구해진 결과는 앞의 3가지 방법보다  $n$ 값은 크고  $C$ 값은 작게 나타났다. Rowecell을 이용한 시험결과에서는 4가지 방법 모두 비슷한 범위의 값을 나타내었다. 특히 Rowecell 7.5cm를 이용해서 얻어진  $n$ 값의 범위 4.46 - 5.06은 Samarasinghe, A. M. (1982)이 발표한 New Liskeard clay, Leda clay의 정규

압밀점토에서 얻어진 4.3 - 5.2와 비슷한 범위의 값을 나타내었다. Sample A 역시 동일한 크기의 시료에 대해서는 해석방법에 따른 차이가 크게 나타나지 않았다. 시료크기에 따른 영향을 살펴보면 이방성에 관계없이 시료크기가 비교적 작은 Oedometer, Rowecell 7.5cm의  $n$ 값이 Rowecell 15cm의  $n$ 값보다 약 1.5 - 2배 정도 작게 나타나지만,  $C$ 값은 대략 10배 정도 크게 나타났다. 따라서 같은 종류의 흙이라 하더라도 시료크기에 따라  $n, C$ 값은 달라진다고 할 수 있다. 이방성의 영향으로는 동일한 크기와 해석방법인 경우  $n$ 값은 비슷하지만  $C$ 값은 Sample A가 Sample B 보다 1.7 - 2.5배 크게 나타나고 있다. 각 시험종류 및 시험방법으로부터 얻어진 투수계수  $n, C$ 값은 Table 4와 같다.

직접투수시험에서 얻은 투수계수( $k$ ) - 간극비( $e$ )의 관계는 Fig 23., 24와 같다. 그림에서처럼  $k - e^n/(1+e)$ 의 관

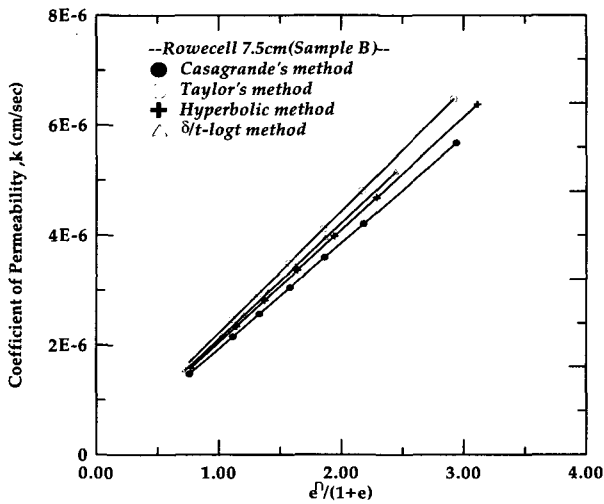


Fig. 18. Correlation between  $e^n/(1+e)$  &  $k$

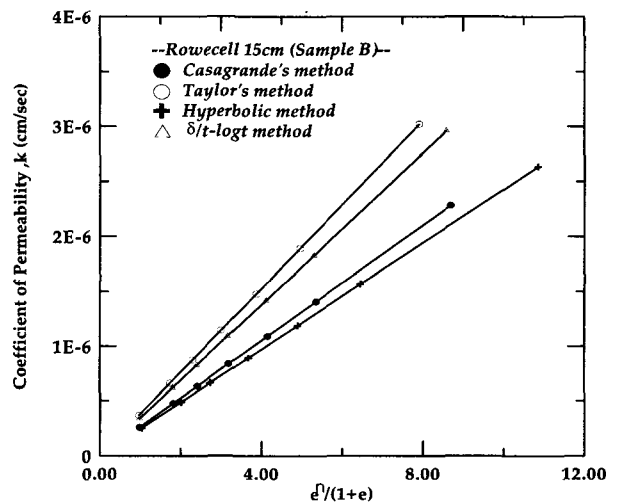


Fig. 19. Correlation between  $e^n/(1+e)$  &  $k$

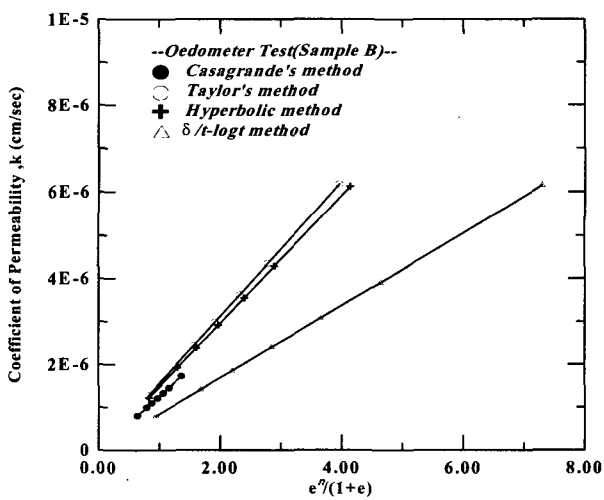


Fig. 20. Correlation between  $e^n/(1+e)$  &  $k$

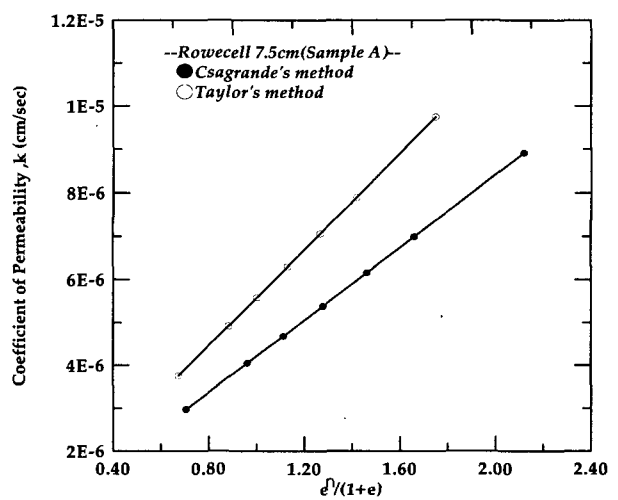


Fig. 21. Correlation between  $e^n/(1+e)$  &  $k$

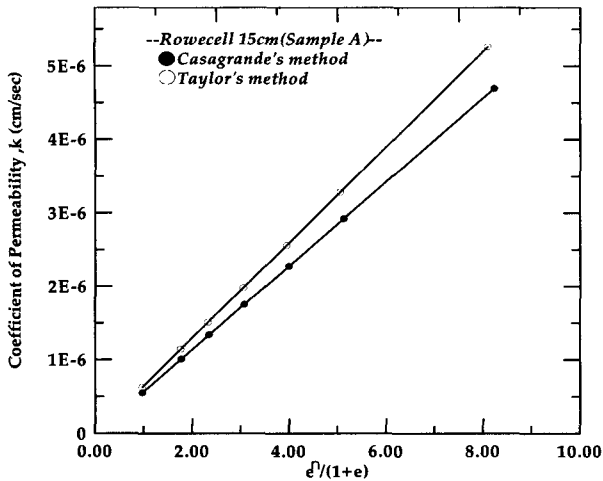


Fig. 22. Correlation between  $e^n/(1+e)$  &  $k$

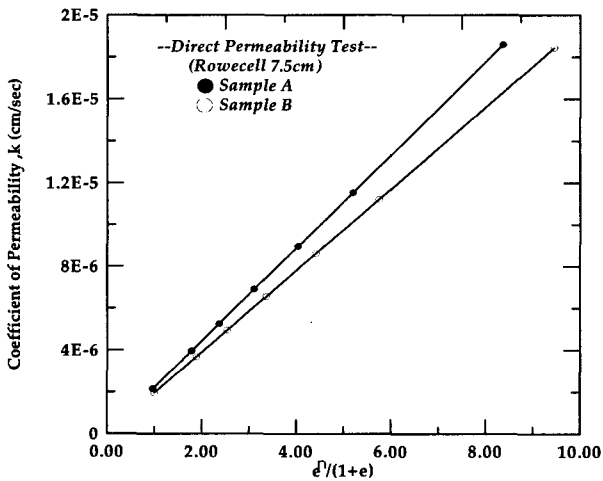


Fig. 23. Direct permeability Test

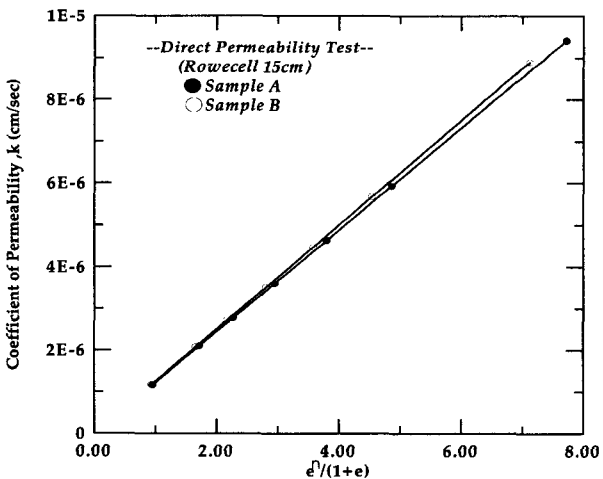


Fig. 24. Direct permeability Test

계가 선형적임을 알 수 있으며, 직접투수시험에서 얻어진 투수상수  $n$  값은 시료의 크기 및 이방성에 따라 큰 차이를 발견할 수 없으나  $C$  값은 시료의 크기에 따라 조금의 차이

가 있음을 알 수 있었다. 또한 Table. 4의 압밀시험에 의해 구해진 투수상수를 이용해 구한 간접투수계수를 직접투수계수와 비교해 보면 동일한 간극인 경우 직접투수계수가 간접투수계수보다 조금더 크게 나타났으며, 이러한 차이는 시료의 크기가 작을수록 더 크게 나타남을 알 수 있었다.

## 5. 결론

포항지역에서 채취한 이암풍화토의 횡방향압밀 및 투수특성에 대한 결론은 다음과 같다.

- 1) 횡방향 압밀계수를 해석방법별로 비교해 본 결과 Sample A인 경우 Taylor방법이 Casagrande방법으로 구한  $C_{\beta 90}$  값보다 약 1.04 - 1.16배 정도 크며, Hyperbolic 방법으로 구한 값은 두 가지 방법으로 구한 값 사이에 존재하므로 초기압축곡선을 구할 수 없는 경우엔 매우 좋은 방법으로 생각된다. Sample B인 경우엔 Taylor 방법으로 구해진  $C_{\alpha 90}$  값이 Casagrande 방법보다 1.06 - 1.65배 정도 크게 나타났다.
- 2)  $C_{\alpha 90}(\text{rowe}) - C_{\beta 90}(\text{rowe})$ , 와  $C_{\beta 90}(\text{oedo}) - C_{\beta 90}(\text{rowe})$ 의 관계식을 이용해 Oedometer 시험으로 간접적인 횡방향 압밀계수를 구할 수 있다.
- 3) 횡방향 압밀계수는 동일한 시료라 하더라도 시료의 크기와 이방성에 따라 차이가 있음을 알 수 있었다.
- 4) 간극비와 투수계수의 관계에서  $k - e^n/(1+e)$ 의 관계가 선형적임을 알 수 있었으며, 여기서 얻어진 투수상수  $n, C$  값 역시 시료의 크기와 이방성에 따라 각기 다른 값들을 나타내었다.
- 5) 압밀시험에서 구한 간접투수계수를 직접투수계수와 비교한 결과 시료의 크기와 방향성이 동일한 경우 직접투수계수가 간접투수계수보다 다소 크게 나타났다.

위의 결과를 통해 본 이암풍화토의 횡방향압밀 및 투수특성은 시료의 크기, 이방성의 영향 그리고 해석방법에 따라 차이가 있음을 알 수 있었다. 따라서 횡방향투수계수의 선정시 공학자의 적절한 판단이 요구된다고 하겠다.

## 참고 문헌

1. Aboshi, H.(1973), "An Experimental Investigation on the Similitude in the Consolidation of a Soft Clay Including Secondary Creep Settlement", Proc. 8th ICSMFE(Moscow) Vol. 4, No. 4, pp. 88-89.

2. Aboshi, H. & Matsuda, H.(1981), "Preconsolidation by Separate-Type Consolidometer", Proc. 10th ICSMFE(Stockholm), pp. 577-580.
3. Aboshi, H.(1991), "On the Prediction of Consolidation Settlement Using Laboratory Data", Proc. Int. Conf. Geotechnical Eng., for Coastal Development, pp. 1029-1030.
4. Casagrande, A. & Fadum, R. E.(1940), "Note on Soil Testing for Engineering Purpose", Harv. Soil Mech. Ser., No. 8.
5. Cour, F. R.(1971), "Inflection Point Method for Computing  $C_v$ ", J. Soil Mech. Fdns Div. Am. Soc. Civ Engrs 97, SM5, pp. 827-831.
6. Duncan, J. M.(1993), "Limitation of Conventional Analysis of Consolidation Settlement", Journal of Geotechnical Engineering, vol. 119, No.9, pp. 1333-1359.
7. Gilboy, G.(1936), "Improved Soil Testing Methods", Engng News Rec. 116, pp. 732-734.
8. Head, K. H.(1986), Manual of Soil Laboratory Testing. Engineering Laboratory Equipment Limited, U. K. pp. 1129-1196.
9. Madhav, M. R.(1964), "Evaluation of the Coefficient of Consolidation a Numerical Method", J. Instn Engrs India 44, No. 11, Part C16, pp. 679-684.
10. Naylor, A. H. & Doran, I. G.(1948), "Precise Determination of Primary Consolidation", Proc. 2nd Int. Conf. Soil Mech. Fdn Eng, Rotterdam 1, pp. 34-40.
11. Pandian, N. S., Sridharan, A., & Kumar, K. S.(1992), "A New Method for the Determination of Coefficient of Consolidation", Geotechnical Testing Journal, Vol. 15, No,1 pp. 74-79.
12. Rowe, P. W. & Barden, L.(1966), "A New Consolidation cell", Geotechnique, vol.16, No.2, pp.162-169.
13. Rao, K. S.(1975), "Curve Fitting Method in the Analysis of Consolidation", Proc. 5th Asian Regional Conf. Soil Mech. Fdn Engng, Bangalore 2, pp. 177-182.
14. Samarasinghe, A. M., Huang Y. H. & Drenvich, V. P.(1982), "Permeability and Consolidation of Normally Consolidated Soil", Journal of Gectechnical Engineering Division, ASCE, Vol.108, pp. 835-850.
15. Scott, R. F.(1961), "New Method of Consolidation Coefficient Evaluation", J. Soil Mech. Fdns. Div. Am. Soc. Civ. Eng. 87, SM1, pp. 29-39.
16. Sivaram, B. & Swamme, P. K.(1977), "A Computational Method for Consolidation Coefficient", Soils Fdns 17, No. 2, pp. 48-52.
17. Sridharan, A. & Sreepada Rao, A.(1981), "Rectangular Hyperbola Fitting Method for One Dimensional Consolidation", Geotechnical Testing Journal 4, pp. 161-168.
18. Sridhrsran, A., Murthy, N. S. & Prakash. K.(1987), "Rectangular Hyperbola Method of Consolidation Analysis", Geotechnique, 37, No, 3, pp. 355-368.
19. Su, H. L.(1958), "Procedure for Rapid Consolidation Test", Soil Mech. Fdns Div. Am. Soc. Civ. Engrs 84, SM3, pp. 1-13.
20. Taylor, D. W.(1948), Fundamental of Soil Mechanics, John Wiley and Sons, Inc., New York, N.Y.

(접수일자 1999, 7, 16)